

TOMOGRAPHIC SYSTEM IMAGE ARITHMETIC METHOD

Publication number: JP11339050

Publication date: 1999-12-10

Inventor: HEUMANN JOHN M

Applicant: HEWLETT PACKARD CO

Classification:

- International: G01N23/04; G06T1/00; G06T11/00; G01N23/02;
G06T1/00; G06T11/00; (IPC1-7): G06T7/00; G01N23/04

- european: G06T11/00T

Application number: JP19990108205 19990415

Priority number(s): US19980067663 19980428

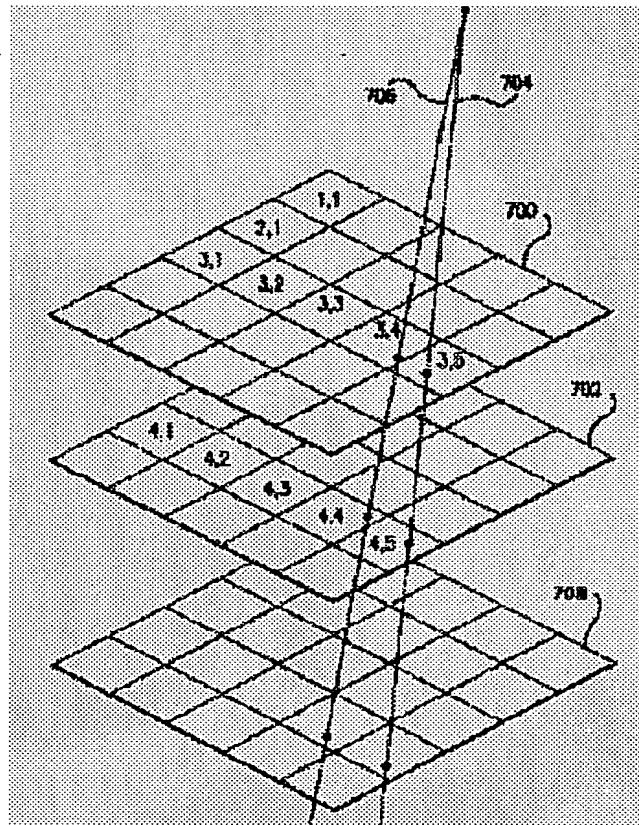
Also published as:

EP0953943 (A2)
US6002739 (A1)
EP0953943 (A3)
EP0953943 (B1)
DE69918596T (T)

[Report a data error](#) [he](#)

Abstract of JP11339050

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a tomographic system image arithmetic method reducing complication in an arithmetic operation and projection data amounts to be processed for tomography. **SOLUTION:** Approximating an object to be image picked up as plural faces 700 and 702 is executed. In this case, faces 700 and 702 of plural boxels having top faces and bottom faces at the opposite side to those top faces are not made partially adjacent to each other, and each face 700 and 702 is made sufficiently thin so that the probability of light beams 704 and 706 made incident or outgoing on or from the surfaces of arbitrary boxels other than the top faces or the bottom faces can be essentially turned into zero. Also, solutions matching a light beam equation are approximate on the faces 700 and 702.



Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY

(51)Int.Cl.⁶G 0 6 T 7/00
G 0 1 N 23/04

識別記号

F I

G 0 6 F 15/62
G 0 1 N 23/04

4 0 0

審査請求 未請求 請求項の数1 OL (全11頁)

(21)出願番号

特願平11-108205

(22)出願日

平成11年(1999)4月15日

(31)優先権主張番号 09/067-663

(32)優先日 1998年4月28日

(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 398038580

ヒューレット・パッカード・カンパニー
HEWLETT-PACKARD COMPANYアメリカ合衆国カリフォルニア州パロアルト
ハノーバー・ストリート 3000(72)発明者 ジョン・エム・ヒューマン
アメリカ合衆国 コロラド、ラブランド、
グロリア・コート 1518

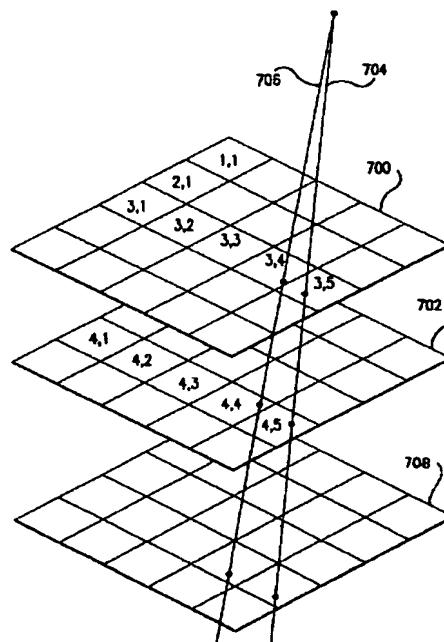
(74)代理人 弁理士 萩野 平 (外4名)

(54)【発明の名称】断層撮影系画像演算方法

(57)【要約】

【課題】 演算の複雑さおよび断層撮影用に処理すべき投影データ量を軽減可能な断層撮影系画像演算方法を提供すること。

【解決手段】 被撮像物体を複数の面700, 702として近似する処理を実行し、頂上面と、この頂上面の反対側に底面を有する複数のボクセルの面700, 702が少なくとも部分的に隣接せずに、かつ、各々の面700, 702が十分に薄く、頂上面または底面以外の任意のボクセルの表面に入射しました出射する光線704, 706の確率を実質的にゼロにする。また、面700, 702について光線方程式に整合する解を近似させる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 被撮像物体を複数の面 (700, 702, 800, 802, 900, 902) として近似するステップであって、頂上面および該頂上面の反対側にある底面を有する複数のボクセルを備えた前記面の各々が、少なくとも部分的に隣接せず、前記面の各々が十分に薄いために、前記頂上面または前記底面以外の任意のボクセルの表面に入射または出射する光線の確率が実質的にゼロであるステップと、前記面について光線方程式に整合する解を近似させるステップと、を有することを特徴とする断層撮影系画像演算方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、多重視野からの断面像のコンピュータ化による再構成に係り、特に、断層撮影系の画像の演算を行う断層撮影系画像演算方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来、この種の多重投影からの物体の断面像を再構成する技術は、広義に断層（写真）撮影法と呼ばれている。この典型的な応用例として、放射源からのX波長放射が物体を透過して電子センサアレイ上に投影する装置が周知である。この例では、1つ以上の物体と、光源と、センサアレイとの間で相対的に移動して多重視野を得るようにしている。次いで、多重視野の数学的変換を行って物体中のスライス像、すなわち、物体の3次元像を近似することができる。よく知られている実際の用途は、医療用のコンピュータ化断層撮影スキャナ（CTスキャナであり、コンピュータ支援断層撮影法またはコンピュータ軸断層撮影法（CATとも呼ばれている）である。

【0003】 断層撮影法は、工業製品の自動検査においても興味深いものである。しかし、コスト、速さまたは多重像を得る機構のため、医療向けの断層撮影法に対するアプローチの多くは、製造面から鑑みて適さないものである。例えば、生産環境での、プリント回路基板に電子部品を実装するはんだ接合（半田付け）の検査を考察すると、検査すべきはんだ接合部は数多くあり、しかも要求される試験時間が短く、理想的には、検査過程が製造プロセスのフィードバック制御システムの一部としてリアルタイムで行われる。このため多くの製造環境においては、1分以内で幾万ものははんだ接合の完全性を確認する必要がある。

【0004】 X線吸収断層撮影法において、多くの撮像技術が断面スライスの再構成に応用されている。積層撮影法（laminography）では、X線源とセンサとを被撮像物体に対して整合した状態で移動させて、選択された焦平面外の物体の部分がセンサ位置で不鮮明な像になるようにしている（例えば、米国特許第4,926,452号

公報参照）。焦平面像は、アナログ平均化処理で再構成している。この利点は、画像再構成に対する光線方程式（ray equations）の膨大な演算（コンピュータ）処理が不要である。これが、積層撮影法を比較的高速な処理を可能とし、かつ、経済的に有利にしている。

【0005】 この欠点の1つは、一度に1つの面のみしか再構成できないことである（この問題に対する部分的解法は、米国特許第5,259,012号公報を適用できる）。別の欠点は、焦点を外れた領域が不鮮明像でありながらも積層撮影像に現れて影となり、かつ、コントラストを低下させることである。実際の物体は、典型的に選択された焦平面の上下に拡がるため、積層写真が不鮮明になる。最後に、焦点を外れた像の間で構築的に補強をすれば、真の物体との識別が困難となる再構成上の人为現象となってしまう可能性がある。

【0006】 断層合成法（tomosynthesis）は、多重投影、すなわち視野を捕捉して組み合わせる積層撮影法に対する近似法である。視野数が多くなるごとに生ずる組み合わせ像は、同一の幾何構造の積層撮影法に基づいて得られた場合と全く同一となる。積層撮影法に優る断層合成法の主なる利点は、組み合わせに先立って投影像をシフトし、この投影が達成された後で観察されるべき焦平面を選択できるということである。断層合成法は、例えば、露出フィルムのシートを重ね合わせる等のアナログ的手法によって、その実行が可能である。

【0007】 デジタル断層合成法では、個々の視野をピクセルに分割し、コンピュータソフトウェアによってデジタル化して組み合わせる処理を実行している。しかし、積層撮影法と同様のデジタル断層合成法では、物体の全ての層が再構成断面に寄与し、影付きの人为現象やコントラスト低下が発生するという不利な点がある。これらの問題に対する部分的解法は、選択される像領域のみが最大強度または最小強度を有する領域であるアプローチによって与えられる。しかし、構築的な（constructive）人为現象が発生し、いくつかの構築的人為現象はこれらのアプローチで強化されてしまうことがある。

【0008】 ファンビーム（fan-beam）断層撮影法は、コンピュータ支援断層法における1つの変形である。これはファン形の平坦出力を有するX線源を被観察物体の一方の側に配置し、かつ、一列のセンサ群を被観察物体の反対側に配置する。X線源およびセンサ群は、固定物体の周りに1平面上で同期して回転する。あるいは、X線源およびセンサ群を固定した状態で物体を回転させていく。比較的低いX線吸収率を有する（生物組織のような）物体に対して、この方法は回転面における物体を通して十分なスライス像となる。物体の3次元像は一連の隣接スライスを電子的に「積み重ねる（stacking）」ことによって得られる。

【0009】 電子組立物類（電子機器）に対しては、この組立物に相対する回転面が重要である。例えば、基板

の表面に鉛をベースとしたはんだ接合を有するプリント回路基板を考慮すると、はんだ接合面に沿ったファンビームスライスが、プリント回路基板を通過する各光線が多くのはんだ接合部分を交差する際に、相当な影付け(shadowing)を受ける。加えて、多くの鉛はんだ接合を十分に通過するエネルギーを有するX線は、電子部品のいくつかに損傷(劣化)を与える場合がある。このためプリント回路基板(電子回路基板)にとては、X線の経路がプリント回路基板面に対して顕著な角度にあることが望ましい。好ましくは、任意の1つの光線が任意の1つの像スライスにおける多くとも1つの鉛はんだ接合部を通過するようとする。

【0010】このため、回転面が、プリント回路基板面に略直角であることが好ましい。これは、光源からセンサまでの距離が、観察されるべき最大物体の幅または高さよりも大きいことが必要であることを意味している。以下で詳細に説明するように、工業環境においては、大型物体にとってより好都合な他の走査経路が存在する。プリント回路基板面に直角であるファンビームスライスを積み重ねることによってプリント回路基板を撮像することが可能である。しかし、ある領域内の全てのはんだ接合に関して、例えば、一集積回路(ICS/LSI)の全てのはんだ接合に対するデータを一度に得ることが有用である。加えて、一般的に、積層されたスライスからの画質(近似、雑音、不鮮明像および人為現象)は、3次元断層撮影法から得ることができる程度の高品質の画質が得られない。

【0011】3次元コンピュータ断層撮影法は、スピード(演算時間)を犠牲にしていることを除けば、積層撮影法または断層合成法よりも正確な像再構成が可能である。3次元コンピュータ断層撮影法は、典型的に多くの投影を必要とし、かつ、演算が集約的である。3次元コンピュータ支援断層撮影法に対する1つのアプローチは、コーン形状の3次元光線を出力するX線源を被観察物体の一方の側に配置し、かつ、2次元のセンサアレイを被観察物体の反対側に配置し、さらに、その物体に相対し、線源/アレイを同期して移動させることである。

【0012】この場合、多くの適切な走査経路がある。任意物体の完全な再構成のためには、走査経路が、この物体を取り囲むようにする必要がある。例えば、X線源を被観察物体の周りに直交円形に移動させるか、X線源を被観察物体を囲む円筒形に沿う螺旋経路またはその他の経路に沿って移動させる。コーンビーム断層撮影法と称されるこのアプローチは、3次元像を再構成する多くの場合に適するものであり、かつ、得られる画質は電子組立物(電子機器)に対する分析にとっても好ましいものである。

【0013】物体を、この投影から再構成するための理論的数学的アプローチは、J. Radon氏によって1917年に提案され、この基本変換は現在、Radon変換と呼称

されている。さらに最近、複数の研究者がコーンビーム再構成についての種々の方法を提案している。例えば、その参照として以下の文献が最適である。

【0014】・「Mathematical Problems of Computerized Tomography」A. K. Louis氏およびF. Natterer氏(Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 3, 379~389ページ(1983年3月))

・「Reconstruction Algorithms: Transform Methods」R. M. Lewitt氏(Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 3, 390~408ページ(1983年3月))

・「Finite Series-Expansion Reconstruction Methods」Y. Censor氏(Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 3, 409~419ページ(1983年3月))

・「Cone-beam tomography: recent advances and a tutorial review」B. D. Smith氏(Optical Engineering, Vol. 29 No. 5, 524~534ページ(1990年5月))

・「Fourier Methods in 3D-Reconstruction from Cone-Beam Data」C. Jacobson氏(博士論文No. 427, Department of Electrical Engineering, Linkoping University, Linkoping, スウェーデン(1996年))

【0015】

【発明が解決しようとする課題】このように上記従来例では、一般的に、各方法とも画質(近似、雑音、不鮮明像および人為現象)と、所要の視野を得るための演算時間や演算難易度との様々なかね合い(トレードオフ/trade-off)がある。適切な画質を実現する一方で、演算速度に対する改善を図り、その経済的をシステムに対する要求が現在も続いている。

【0016】本発明は、このような従来の技術における課題を解決するものであり、演算の複雑さおよび断層撮影用に処理すべき投影データ量を軽減可能な断層撮影系画像演算方法の提供を目的とする。

【0017】

【課題を解決するための手段】上記課題を達成するためには、本発明の断層撮影系画像演算方法によれば、一組の近似と関連方法によって、演算の複雑さおよび断層撮影用に処理すべき投影データの量が軽減された多くの実施形態が提供される。多くの診断目的においては、完全な3次元画像再構成が必要なく、少數の断面で十分である。各実施形態においては、再構成される画像を比較的小さい薄断面の組に限定することによって、画像再構成のための演算が簡略化され、より高速化される。このため、演算に必要な画像要素の数が低減し、画像要素および光線の交差に関する演算が簡略化される。コーンビーム投影では多数の面をピクセル群に分割するという方法の改善によって、演算の複雑さがさらに軽減される。

【0018】このように、本発明の断層撮影系画像演算方法は、断層撮影系の画像演算を行う薄断面の反復再構成による断層撮影処理での、演算の複雑さおよび断層撮

影用に処理すべき投影データ量を軽減することができる。

【0019】

【発明の実施の形態】以下に、本発明の断層撮影系画像演算方法の実施の形態を、図面を参照して詳細に説明する。図1は、電子回路基板（両面プリント回路基板）を示す断面図である。図1において、この両面プリント回路基板100は、多数の電子部品が2つの外表面の回路パターンやスルーホールの各々にはんだ付けされて接続（固定）されている。電子部品102、104は、図における上部の第1表面上に取付けられている。電子部品108は図における下部の第2表面上に取付けられている。電子部品106は、第2表面上にスルーホールで取付けされた部品であり、そのリード線は両面プリント回路基板100の両面を貫通している。電子部品102は、ボールグリッド(ball-grid)配列の半田接合（バンブ半田付け）によって接続（固定）されている。

【0020】電子部品104は、両側リード線を半田付けして表面実装されている。電子部品108は、Jリード型表面実装によって接続されている。両面プリント回路基板100の第1表面から多少外れたところの破線110で示した一方の面を、電子部品102、104および106のリードおよびソルダーパーツ（solder fillets）が貫通している。両面プリント回路基板100の第2表面を多少外れた、破線112で示された他方の面を、電子部品106および108のリードおよびソルダーパーツが貫通している。各半田接合の3次元像を得ることが有用であるとともに、像面110、112は、各部品のリードが存在していることを確定するのに十分な情報が得られ、さらに様々な半田接合の検査にとって有用な情報が得られる。

【0021】図2は、円形走査型コーンビーム断層撮影系を示す概略図である。図2において、X線源200は、コーン形パターンによるX線放射を行っている。このX線は、被撮像物体202を透過する。このX線はセンサ群204のアレイによって検知される。X線源200は、多重視野を得るために、図示したように円形バスを移動する。この移動とともに、センサ群204も等位の円形バスを移動する。X線は電子ビームでX線管の表面からの発生する。この電子ビームを電子的に偏向させることによって、X線源は効果的に移動する。以下の説明において、X線源は、点源として取り扱える程度に十分を小さいものであると仮定できる。多重画像を得るために、その他の多くの移動バスがある。

【0022】したがって、以下の説明は、特定のどの移動バスにも限定されない。背景を考慮すれば、ある物体の完全な3次元再構成において、走査バスはその物体を取り囲む必要がある。図2に示したバスは、任意の被撮像物体202の、正確かつ数学的に完全な3次元再構成に適合するデータを得ることができない。しかし、以下

に説明するように、再構成されるべき任意の限定された面について実用に供することが可能となる十分なデータが得られる。さらに、留意すべき点は、図2に示した走査バスが大きく、かつ、略平坦な物体を走査する際に便利なことである。なお、大きい平坦な物体は、X線源とセンサとを大きい物体の周りに完全に移動させなくても、異なった物体部分の撮像を実現できるよう2次元移動させても良い。在来型のデジタル断層写真法は、ボクセル（voxel）と呼ばれる個別の容積要素（discrete volume elements）によって物体を近似するものである。

【0023】図3は、125（5×5×5）個の同一サイズの立方ボクセルに細分された立方体の物体300を示す説明図である。図3において、物体300の3次元撮像をするためには、125個のボクセルの各々の密度（または吸収係数、または材料の厚さ）が、図2のアレイ204のようなセンサアレイで検出される物体300の多重視野で表されるデータから再構成する必要がある。多くの用途では、完全な3次元画像は不要である。例えば、図1の両面プリント回路基板100では、半田接合（半田つけ）の品質を確定する場合、2つの像面（110、112）で十分である。

【0024】図4は、図3の物体300についてのボクセルの2層を示す説明図である。図4において、留意すべきは、本実施形態が理解し易いように2層を用いている点である。これは、少なくとも2層を用いて、本実施形態を総括的に説明するものである。さらに、留意すべきは、2つの平行な層を図示しているが、これは平行でない層にも適用できる点である。図4に示したように、わずか2層だけで特定の用途について十分な画像情報が得られるなら、再構成されるべきボクセル数が実質的に低減できるものである。図3および図4で表されるボクセルでは、層数が5から2へ減少できるが、典型的な応用例では、層数は数百または数千の層から10未満の少數の層に低減できるようになる。

【0025】図5は、点源500から立方ボクセル502を透過して、センサ素子504上に入射する状態を示す説明図である。図5において、センサ素子504の4隅を点源500に結合する線によって5面体が形成される。ここで、立方ボクセル502が均一な吸収率を有する材料で充填されていると仮定する。このときのX線吸収撮像法では、5面放射体の立方ボクセル502との交差が、立方ボクセル502による吸収を決定する。典型的には、放射が各放射線が単一線である一組の放射線としてモデル化される。したがって、図5の交差体積が、ボクセルと交差する全ての放射線に対して積分することによって得られる。

【0026】X放射の単色光線が吸収材料を透過する際の（回折しない場合の）相対的減衰が、次式（1）で与えられる。

【0027】

【数1】

$$\frac{I}{I_o} = e^{-\int \sigma(r) dr} \quad \dots \quad (1)$$

【0028】ここで σ は線吸収係数であり、その積分をビームパスに沿って演算する。この演算は、両辺の自然対数をとれば、次式(2)で表される。

【0029】

【数2】

$$-\ln\left(\frac{I}{I_o}\right) = \int \sigma(r) dr \quad \dots \quad (2)$$

【0030】線積分に対する離散近似は、典型的および実際には、次式(3)で表される。

【0031】

【数3】

$$y_i = \ln\left(\frac{I}{I_o}\right)_i = \sum a_{ij} x_j \quad \dots \quad (3)$$

【0032】この式(3)において、 y_i は測定された投影値であり、 a_{ij} は基本関数であり（ボクセル内で直線放射と、均一吸収が与えられた際に、放射線 i とボクセル j と間の交差の大きさがボクセル j 中の放射線 i の経路長である）、 x_j は未知のボクセル内の有効線吸収係数である。

【0033】各投影の各放射線は、式(3)と類似の単一の式となる。得られる式系は、典型的には線形独立ではない。得られる式系に整合する解を近似させる方法として、多くの提案がなされている。例えば、前記の従来の技術で引用した、Lewitt氏の論文およびCensor氏の論文が参考可能である。フーリエ(Fourier)法およびフィルタ(ろ波)後方投影(filtered backprojection)のような変換方法は、逆ランダム変換の解に対する離散近似に基づいている。変換法と対照して、直列展開法(series-expansion methods)の方法が周知であり、これは、それらの開始点として式(3)のような一組の離散光線方程式を採用するものである。

【0034】直列展開法の例には、代数的再構成手法(Algebraic Reconstruction Technique(ART))のような反復法に加えて、離散光線方程式の直接反転または疑似反転が含まれる。この変形例として、同時反復再構成手法(Simultaneous IterativeReconstructive Technique(SIRT))、同時代数的再構成手法(Simultaneous Algebraic Reconstructive Technique(SART))、最大エントロピー(Maximum Entropy(MENT))およびその他の多くが周知である。本実施形態においては、SIRTに類似の方法を説明として用いる。

【0035】单一光線は、単一層のボクセルにある多くのボクセルと交差することができる。すなわち、光線は、ボクセルの6面(表面)のいずれか、またはその8

つの頂点のいずれかで、また、その12のエッジのどれかでボクセルに入射し、かつ、出射することができる。図6は、単一の光線600が4つのボクセル中の2つと交差する状態を示す説明図である。図6において、光線600は、ボクセル(2, 1)の頂上面に入射し、ボクセル(2, 1)とボクセル(2, 2)との間の共通面を透過し、ボクセル(2, 2)の底面から出射する。ボクセル内の直線放射および均一吸収を仮定すれば、光線の基本関数は、ボクセル内の光線の経路長である。結果として、基本関数(a_{ij})は、各光線および各ボクセルについて別々に演算を行う必要がある。

【0036】2層近似に関して、頂上および底部層の任意の光線についての基本関数間には、単純な関係を有しない。しかし、図4における層が無限に薄くなる場合、厚さが0(ゼロ)に近づく極限では各層は面と近似され、ボクセルは2次元のボクセルに置換される。したがって、頂上面または底面以外の面を通して入射しかつ出射する光線の確率が、ゼロに接近する。この結果、基本関数の演算が大幅に簡略化される。このとき各光線は、層当たり正確に1つのピクセルに交差し、このピクセル内の経路長が光線の角度にのみ依存する。なお、層には依存しない。特に、基本関数は $1/\cos(\phi)$ に比例し、ここで ϕ は、その光線の方位角(表面法線に対する光線の角度)である。得られる基本関数は、飛翔中に(on the fly)演算するかまたは事前演算して、かつ、記憶するようにしても良い。

【0037】再構成された断面像を解釈する場合、吸収材料は、実際の分布では厚く拡がるが、薄層に凝縮されると仮定される。物理的な正確な吸収値は非負でなければならず、かつ、薄層近似以前の線吸収係数とボクセル内の最大経路長との積未満または等価である必要がある。結果として、多重薄層近似に関しては、代数的再構成手法は、代数的再構成では更新中に吸収値に対する制約を織り込むことができるため、変換方法より好ましいものである。

【0038】図7は、2つの薄い面(700, 702)とセンサアレイ708との部分を有するコーンビーム断層撮影系を示す説明図であり、物体が分離した薄い面によって近似されることを示している。図7において、センサアレイ708は、その説明の簡略化のため 5×5 個の要素を配置しているが、代表的系では、検出器アレイが 2048×2048 要素のオーダーであっても良い。一般的に、図7では、光線704, 706が、各面において対応する数のピクセルと交差しない。光線704は、面700でピクセル(3, 5)と交差し、面702ではピクセル(4, 5)と交差することに注意する必要がある。同様に、光線706は、面700でピクセル(3, 4)と交差し、面702ではピクセル(4, 4)と交差する。図7では、各面内のピクセルは、全て同一寸法を有している。または、比較的小さいピクセルを対象

領域に適用し、大きめのピクセルを対象の領域外に適用しても良い。

【0039】一般的に、センサアレイ 708における要素の寸法と物体面におけるピクセルの寸法との間には、特別に必要とされる関係を有しない。センサアレイの要素を大きめの検知領域中に分類するのが普通である。例えば、センサアレイは、比較的大きい有効センサ要素サイズを 2×2 個のセンサ要素に分割しても良い。以下の説明において、「有効センサ要素(effective sensor element)」は、単一のセンサ要素を示すか、単一センサ要素として取り扱われる一群の要素を示している。

【0040】なお、演算は、各面での倍率で定められる別々のピクセルサイズを有することができる場合に(倍率は、光源からの距離に逆比例する)、さらに簡略化できる。特に、各面が、特定の投影で I および J の特定値に関して、特定の有効センサ要素 (I, J) の中心と交差する光線があらゆる物体面上のピクセル (I, J) の中心と交差するようなピクセルサイズを有する場合は、その演算が簡略化される。

【0041】図 8 は、異なるピクセル密度を有する面を有し、かつ、分離した薄い面によって物体が近似されることを示すコーンビームコンピュータ断層撮影系を示す説明図であり、光線があらゆる物体面に対する同一の対応ピクセルと交差することを説明する。図 8 において、座標原点および各物体面でのピクセルサイズは、点源から有効センサ要素 (I, J) の中心への光線が、各物体面上の要素 (I, J) の中心を通過するように決定される。光線 804 は、センサアレイ 808 の有効要素

(4, 4) と交差し、物体面 800, 802 上のピクセル 4, 4 と交差する。光線 806 は、センサアレイ 808 の有効要素 (4, 3) と交差し、物体面 800, 802 上のピクセル (4, 3) と交差する。物体面 800 上のピクセルは、物体面 802 上のピクセルより比較的小さい。物体面 802 上のピクセルは、センサアレイ 808 上の有効センサ要素よりも比較的小さい。

【0042】図示した構成配置では、物体面 800, 802 が、各投影に関して異なる原点を有する。ここで図 8 の系に関して(図 5 に示されているように)、一組の光線から成る放射体の交差問題を考察する。図 8 では、センサアレイ 808 上の各有効センサ要素が、点源とともに各物体面において、一要素の領域を正確に包含する 3 次元の放射体を決定する。このため、図 5 および図 7 によって示された系と対照して、図 8 の系は、基本関数が各面の対応するピクセルに関して同一であり、ピクセルとの交差領域にわたる光線の積分を実質的に簡略化する。実際、基本関数を $1 / \cos(\phi)$ に比例するとして近似すれば十分である。各ピクセルに関して、有効センサ要素にぶつかる放射との交差領域は、常にかつ正確にそのピクセル領域である。

【0043】図 9 は、図 8 に示したような 2 つの平行物

体面を有する配置に対するいくつかの数学的関係を示す説明図である。図 9 では、下側の物体面 900 と上側の物体面 902 を有している。各物体面内には、各物体面内に実線で表された対象領域を有している。撮像されるべき物体は、物体面において破線で示したように、その対象領域を越えて拡張しても良い。例えば、全面積が $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ のオーダーであるプリント回路基板では、撮像する対象領域が $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ から $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ までの範囲にあっても良い。

【0044】このとき物体全体は、光源およびセンサアレイを移動させるか、または物体を動かし、対象領域を移動させて走査される。座標系は、Z 軸が 2 つの物体面と直角を形成し、かつ、対象領域の中心に配置されるように選択する。下側の物体面 900 は $z = 0$ であり、上側の物体面 902 は $z = z_u$ であり、光源 904 が $z = z_s$ であり、かつ、センサアレイ 906 は $z = z_d$ である。破線 908 は光源 904 をセンサアレイ 906 の中心に結び付けている。破線 908 は $z = 0$ を通過し、その ϕ が Z 軸に対する光線(例えば、908)の角度となる。

【0045】P 個の投影がある。この各投影では、下側の物体面 900 の対象領域全体を撮像する。各投影では、対象領域より多少小さい上側の物体面 902 上の面積を撮像する。上側の物体面 902 については、対象領域全体の拡張集合(superset)を、P 個の投影の和集合(union)で撮像する。各投影は、各物体面上の $M \times N$ 個のピクセルを撮像する。円形走査を想定して、i 番目の投影に対して、光源 904 を、 $z = z_s$ の面上において、 z 軸から距離 r_s 、 $2\pi(i-1)/P$ の角度で配置する。

【0046】センサアレイ 906 は、光源の角位置に余角である角位置で $z = -z_d$ の面上において、 $r_d = r_s z_d / z_s$ の中心に配置する。なお、センサアレイ 906 に対して照度およびセンサ要素感度の変化を補正するために校正を行っても良い。光線投影方程式は、相対強度の対数 $-\ln(I/I_0)$ をとることによって線形化される。

【0047】各投影によって、下側の物体面 900 上に $(z_s + z_d) / z_s$ の倍率で $M \times N$ 個のピクセルが撮像される。

【0048】各投影によって、上側の物体面 902 上に $(z_s + z_d) / (z_s - z_u)$ の倍率で $M \times N$ 個のピクセルが撮像される。

【0049】倍率は、センサアレイの位置でのものであって、面が光源に近付くごとに増大することに注意する必要がある。

【0050】上側の物体面 902 に対する投影の中心は、 $\delta = (r_s / \epsilon) (z_u / z_s) \{ (z_s + z_d) / (z_s - z_u) \}$ で表される個数のピクセルのみが Z 軸からシフトされる。ここで ϵ は、有効センサ要素のエッジ

の線サイズである（図解のため方形ピクセルを想定しているが、要求されてはいないことに注意する必要がある）。下側物体面の対象領域にあるピクセルの全数およびセンサアレイ 906 にあるセンサの全数が、 $M \times N$ である。上側の物体面 902 の対象領域にあるピクセルの全数は、 $(M + 2\delta) \times (N + 2\delta)$ である。

【0051】前記したように、単一の光線に交差する両ピクセルの基本関数(a_{ij})は、相等しく、かつ、方位角 ϕ によってのみ定められる。前記した式(3)のように、光線方程式は、その離散形が次式(4)で表される。

【0052】

$$x(k+1) = x(k) + \lambda_k \frac{y_i - [a_i \cdot x(k)]}{a_i \cdot a_i} \quad \dots \quad (5)$$

【0056】ここで、 i は投影数であり、 x は吸収値の列(column)ベクトルであり、 y_i は相対強度測定値の自然対数の列ベクトルであり、 a_i は基本関数 $A = (a_{ij})$ の $M \times N$ 行列の i 番目の行(row)の転置行列であり、 λ_k は j 番目の反復の増分(stepsizes)、すなわち緩和定数である（但し、 $0 < \lambda_k < 2$ ）。各物体面の各ピクセルは、反復ごとに更新し、全ての光線にわたって補正を平均化し、かつ、変更前の投影を x 値にする。前記したように、各センサピクセルの中心を通過する光線について、可変ピクセルサイズを使用すれば、単一投影における2つの光線は与えられた物体面の同一ピクセルと交差しないことになる。

【0057】特定ピクセルと交差する光線全てを事前に演算することによって、光線に代えて大域(global)ピクセルによる演算を命令して、蓄積補正値の記憶を最小にすることができる。 x 値をゼロに初期化し、最初の反復に対しては 2 の増分 (λ)、およびその後については 1 を増分にすれば、前記した方法によって 3 回程度の少ない反復で良好な再構成が得られる。1 つのテストケースでは、図 8 のように定義されたピクセルおよび 2 つの再構成層による前記した方法は、2 つの対象面においてのみ小ボクセルを使用し、その他の場所では大きいボクセルによる 5 面多重解アプローチを用いる場合、3 次元の再構成より一桁以上の高速化が可能になる。

【0058】各反復では、各投影ピクセルに対する x の補正値が演算された後に、上側の物体面 902 に対する種々の投影を組み合わせなければならない。一例の方法を次に示す。上側の物体面 902 の対象領域は、 $(M + 2\delta) \times (N + 2\delta)$ 個の大域ピクセルに分割される。特定投影に関する $M \times N$ 個のピクセルは、大域ピクセルと完全に軸一致しなくても良い。各投影の各光線は、これが対象面と光線の交点に最も近接している大域ピクセルの中心と交差するように取り扱われる。（光線が 2 つ以上の隣接した大域ピクセル間の境界と交差するときの）繋ぎ目(ties)は、変わらず行われる限り、任意のビ

【数 4】

$$y_i = \sum a_{ij} x_j \quad \dots \quad (4)$$

または

$$y = Ax \quad \dots \quad (4')$$

【0053】式(4')において、 y および x はベクトルを表し、 A は行列を示している。

【0054】光線方程式を解く典型的な反復アプローチが、次式(5)で表される。

【0055】

【数 5】

の決定論的な (deterministic) 方法を使用しても屈折することがある。あるいは、大域ピクセルに対する補正値は、隣接投影ピクセルからの補正値の 2 次元補間によって、個々の投影のピクセルに対する補正値から演算しても良い。

【0059】図 10 および図 11 は、本発明の本実施形態に係る処理手順を示すフローチャートである。図 10 では、各投影 (ステップ 1000, 1004, 1006) に対して、 $M \times N$ 個の強度値は、 $M \times N$ 個のセンサアレイ (ステップ 1002) によって測定される。図 11 では、各反復 (ステップ 1008, 1030, 1032)、各像面 (ステップ 1010, 1024, 1028)、および各組の測定投影データ (ステップ 1012, 1016, 1018) に対して、補正値は $M \times N$ 個の投影ピクセルに対して演算が行われる (ステップ 1014)。次いで、各大域ピクセルに対する補正値を、投影ピクセル (ステップ 1020) と各大域ピクセルに対する補正値とから演算し、この補正値を先に演算した画像値に加算する (ステップ 1022)。

【0060】なお、代替法として、個々の投影に対する補正値を記憶せずに、光線に代えて大域ピクセルによる演算を指示することもできる。ステップ 1020 は、特に分離処理である必要はない。また、投影ピクセルに対する補正値が最近接大域ピクセルに割り当てられる場合、大域ピクセルに対する補正値は、投影ピクセルに対する補正値を別々に演算しなくても、ステップ 1014 で直接演算することもできる。

【0061】図 8 に示す系では、ピクセルサイズが面内で均一になるように各面がセンサアレイに平行の場合、その演算が大幅に簡略化される。しかし、図 7 に示すように、有効センサ要素のサイズと物体面のピクセルサイズとの間に何ら関係がない系では、各面は平行である必要がなく、かつ、各面は対象領域外で交差しても良い。物体面は Z 軸に平行であるか、その他の任意の対象方位であっても良い。

【0062】本発明の前記した内容は、図解と説明のために提示したものである。発明を網羅するものでもまたは開示された正確な形態に限定するものでもなく、かつ、その他の修正および変更が前記した教示内容に照らして可能である。実施形態は、当業者において考えられる特定用途に適合するように種々の修正が可能である。本発明の原理とその実際的応用を最適に説明するために、選択し、かつ、説明したものである。添付の請求の範囲は、従来技術によって制限される場合を除いて、本発明のその他の代替実施形態を包含すると解釈できるものである。

【0063】以下に本発明の実施の形態を要約する。

1. 被撮像物体を複数の面（700, 702, 800, 802, 900, 902）として近似するステップであって、頂上面および該頂上面の反対側にある底面を有する複数のボクセルを備えた前記面の各々が、少なくとも部分的に隣接せず、前記面の各々が十分に薄いために、前記頂上面または前記底面以外の任意のボクセルの表面に入射または出射する光線の確率が実質的にゼロであるステップと、前記面について光線方程式に整合する解を近似させるステップと、を有する断層撮影系画像演算方法。

【0064】2. 前記面が平行である上記1記載の断層撮影系画像演算方法。

【0065】3. 前記面が対象とする領域内で交差しない上記1記載の断層撮影系画像演算方法。

【0066】4. 特定の面（800, 802）での有効倍率が放射源からの前記特定の面の距離に逆比例するよう、各々の面にピクセルサイズを割り当てるステップを、さらに有する上記1記載の断層撮影系画像演算方法。

【0067】5. 前記放射源から有効センサ要素の中心へのラインが各面におけるピクセルの中心を透過するよう、各投影に際し、各面にピクセル位置を割り当てるステップ、をさらに有する上記5記載の断層撮影系画像演算方法。

【0068】6. 特定の面における対象の領域全体を大域ピクセルに分割するステップと、全ての大域ピクセルに初期画像値を割り当てるステップと、前記特定の面上への各投影について、各投影ピクセルに対する補正值を演算するステップと、特定の大域ピクセルに物理的に最も近接した投影ピクセルを決定するステップと、前記最も近接した投影ピクセルの補正值を前記特定の大域ピクセルの画像値に加えることによって前記特定の大域ピクセルの画像値を補正するステップと、をさらに有する上記5記載の断層撮影系画像演算方法。

【0069】7. 特定の面における対象の領域全体を大域ピクセルに分割するステップと、全ての大域ピクセルに初期画像値を割り当てるステップと、前記特定の面上への各投影について、各投影ピクセルに対する補正值を

演算するステップと、特定の大域ピクセルに物理的に近接した一組の投影ピクセルを決定するステップと、特定のピクセルに物理的に近接した前記一組の投影ピクセルの補正值を変更して、前記特定の大域ピクセルの位置で補正值を得るステップと、前記特定の大域ピクセルに対する更新された補正值を前記特定の大域ピクセルの画像値に加えることによって、前記特定の大域ピクセルの画像値を補正するステップと、をさらに有する上記5記載の断層撮影系画像演算方法。

【0070】

【発明の効果】以上の説明から明らかなように、本発明の断層撮影系画像演算方法によれば、断層撮影系の画像の演算を行う薄断面の反復再構成による断層撮影処理での演算の複雑さ、および断層撮影用に処理すべき投影データ量を軽減できるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】電子回路基板を示す断面図である。

【図2】円形走査型コーンビーム断層撮影系を示す概略図である。

【図3】立方ボクセルに細分された立方体の物体を示す説明図ある。

【図4】物体のボクセルの2層を示す説明図である。

【図5】点源から立方ボクセルを透過して、センサ素子上に入射する状態を示す説明図である。

【図6】単一の光線波が4つのボクセル中の2つと交差する状態を示す説明図である。

【図7】物体が分離した薄い面によって近似されることを示すコーンビーム断層撮影系の斜視図である。

【図8】異なるピクセル密度を有する面を有し、かつ、分離した薄い面によって物体が近似されることを示すコーンビーム断層撮影系を示す説明図である。

【図9】2つの平行物体面を有する配置に対するいくつかの数学的関係を示す説明図である。

【図10】処理手順を示すフローチャートである。

【図11】処理手順を示すフローチャートである。

【符号の説明】

100 両面プリント回路基板

102, 104, 106, 108 電子部品

110, 112 像面

200 X線源

202 被撮像物体

204 センサ群

300 立方体物体

500 点源

502 立方ボクセル

504 センサ素子

600, 704, 706, 804 光線

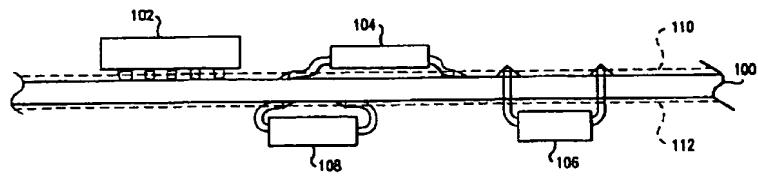
700, 702 面

800, 802, 900, 902 物体面

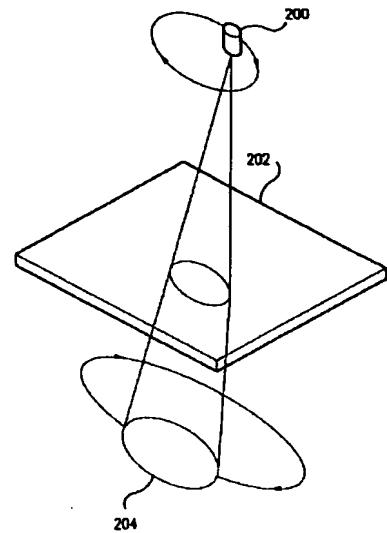
808, 904 センサアレイ

904 光源

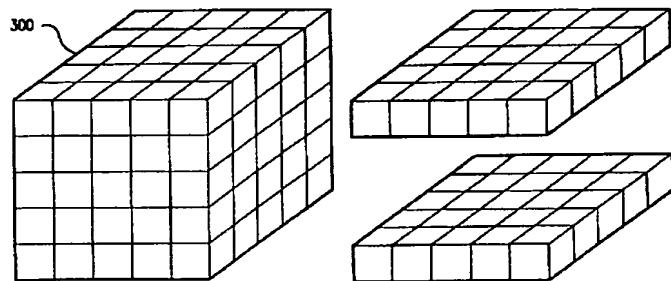
【図1】



【図2】



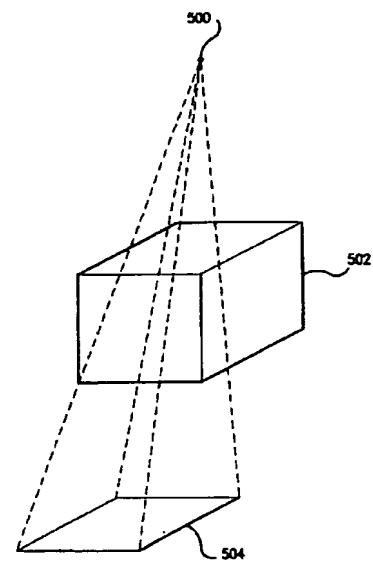
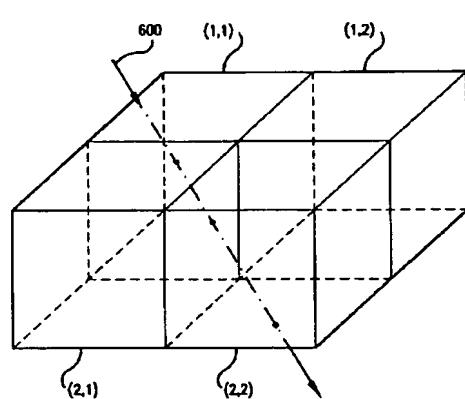
【図3】



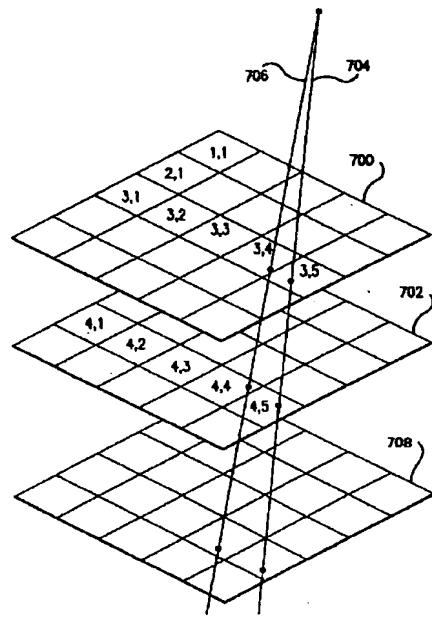
【図4】

【図5】

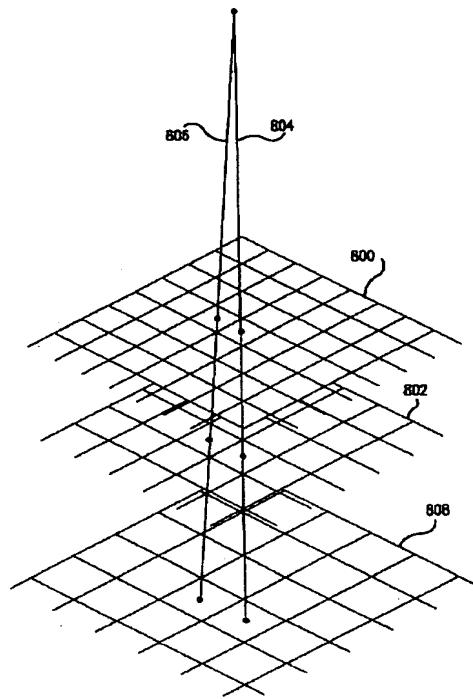
【図6】



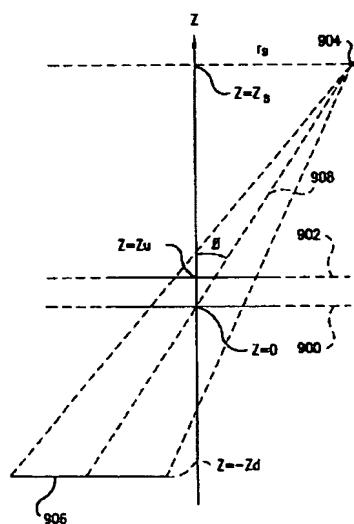
【図 7】



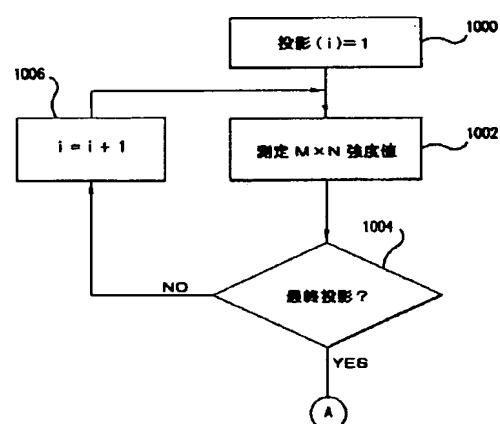
【図 8】



【図 9】



【図 10】



【図1-1】

